

# ОПТИМАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ

С. Ю. Ермолаев

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия

На основе генетического подхода решена задача оптимального размещения базовых станций при создании беспроводной широкополосной сети передачи информации. Сформирована математическая модель генетического подхода применительно к решению рассматриваемой задачи. Данная модель реализована в виде генетического алгоритма и соответствующего программного обеспечения, позволяющего эффективно решать задачи размещения большой размерности. Корректность теоретического анализа подтверждена данными, полученными методом полного перебора. Проведена оценка времени счета в зависимости от параметров задачи. Показано, что для задач малой и средней размерности разработанный алгоритм обеспечивает минимальное время счета. Результаты решения задачи для конкретного примера демонстрируют неоспоримое преимущество генетического подхода. Полученные результаты могут быть успешно применены для создания муравьиных алгоритмов оптимизации размещения базовых станций.

Based on the genetic approach, the problem of optimal placement of base stations when establishing the wireless wideband communication network has been solved. A mathematical model of the genetic approach was formed in order to solve this problem. This model was realized as a genetic algorithm as well as the appropriate software that allows effective solving the placement problems of large dimension. The correctness of theoretical analysis is confirmed by the data obtained through the exhaustive method. An estimation of the computing time depending on the problem parameters is carried out. It is shown that the algorithm designed provides the minimal computing time for problems of small and middle dimension. The results of this problem solution for a specific example demonstrate a great advantage of the genetic approach. The results obtained can be successfully applied for creating the ant colony optimization algorithms of base stations placement.

## Введение

На этапе предварительного планирования беспроводной широкополосной сети передачи информации решается задача оптимального размещения базовых приемо-передающих станций. Задача состоит в том, чтобы на заданной территории разместить минимально возможное количество базовых станций при подключении к ним заданного множества абонентов с обеспечением соответствующего качества услуг. Оптимальность размещения базовых станций и подключения к ним абонентов определяется по критерию минимальной стоимости при наличии ряда ограничений.

Для решения данной задачи будем использовать современный оптимизационный аппарат на основе генетического подхода. Генетические алгоритмы широко применяются для решения задач оптимизации в различных областях науки и техники [1, 2].

## Постановка задачи

Целью работы является исследование генетического подхода применительно к решению задачи оптимального размещения базовых станций, разработка математической модели, ее реализация в виде генетического алгоритма и сравнительная оценка его характеристик.

Упрощенная задача синтеза беспроводной сети решалась в [3] без учета свойств реальных каналов. В данной работе используется модель распространения сигналов в радиоканале, учитывающая потери, интерференцию, эффект Доплера, а также тип и рельеф местности. Согласно [4] эта модель хорошо подходит для проектирования беспроводных сетей фиксированного доступа в диапазоне 1–5 ГГц.

## Математическая модель

Потери при распространении электромагнитной волны рассчитываем по следующей формуле [4]:

$$L = s + 20 \lg(4\pi r_0 / \lambda) + 10\gamma \lg(r / r_0) + 6 \lg(f / f_0) - 20 \lg(h / h_0), \text{ дБ}; \quad (1) \\ \gamma = a - b h_b + c / h_b,$$

где  $\gamma$  — коэффициент затухания;  $s$  — случайная составляющая потеря, дБ, подчиняющаяся логарифмически-нормальному закону распределения;  $\lambda$  — длина волны в свободном пространстве, м;  $r$  — расстояние между базовой и абонентской станциями, м;  $h_b$  — высота антенны базовой станции, м;  $h$  — высота антенны абонентской станции, м;  $f$  — рабочая частота, МГц;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — константы, зависящие от типа местности;  $r_0 = 100$  м;  $h_0 = 2$  м;  $f_0 = 2000$  МГц.

Формула (1) является основой модели Хата-Окамура и хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными при определении потерь мощности сигнала в беспроводных сетях фиксированного доступа. Она позволяет рассчитывать потери для различных типов местности в широком диапазоне частот при различных высотах антенн базовых и абонентских станций. По величине вносимых потерь все местности подразделяются на категории. Максимальные потери характерны для холмистой местности с плотностью деревьев от средней до значительной (категория  $A$ ). Равнинная местность с малой плотностью деревьев относится к категории  $C$ , соответствующей минимальным потерям. Промежуточный вариант в отношении потерь мощности при распространении сигнала представляет категория  $B$ .

На этапе анализа распределения трафика выполняется маркетинговое исследование, в ходе которого обычно удается определить потенциальных пользователей будущей сети, их тип и количество, а также спектр необходимых им услуг. Это дает возможность при известном расстоянии от места кандидата на расположение базовой станции до антенны пользователя провести оценку нагрузки на базовую станцию.

Решение рассматриваемой задачи сводится к вычислению и минимизации следующей целевой функции стоимости:

$$\Phi = \sum_{k,n,m} W_{knm} X_{nm} Y_{km} + \sum_{n,m} c_n X_{nm} + \sum_{k,m} Y_{km} / g_{km}, \quad (2)$$

где  $k=1,2,\dots,K$ ;  $K$  — число пользователей с заданными координатами;  $n=1,2,\dots,N$ ;  $N$  — количество типов базовых станций;  $m=1,2,\dots,M$ ;  $M$  — число мест кандидатов на расположение базовых станций с известными координатами;  $W_{knm}$  — стоимость подключения  $k$ -го абонента к станции  $n$ -го типа, размещенной на  $m$ -м месте кандидате;  $X_{nm}=1$ , если станция  $n$ -го типа размещена на  $m$ -м месте кандидате, иначе  $X_{nm}=0$ ;  $Y_{km}=1$ , если  $k$ -й абонент подключен к станции, размещенной на  $m$ -м месте кандидате, иначе  $Y_{km}=0$ ;  $g_{km}$  — коэффициент, учитывающий условия распространения сигнала в радиоканале между  $k$ -м абонентским терминалом и базовой станцией, размещенной на  $m$ -м месте кандидате;  $c_n$  — стоимость станции  $n$ -го типа.

Первый компонент функции (2) определяет стоимость подключения пользователей при заданной конфигурации сети, второй компонент соответствует стоимости базовых станций, третий компонент учитывает потери мощности в радиоканале

при распространении сигналов. Выражение (2) является модифицированной версией целевой функции, рассмотренной в [3], и отличается от нее наличием последнего компонента. Учет этим компонентом потерь мощности сигнала повышает точность математического описания рассматриваемого расположения базовых станций.

Коэффициент  $g_{km}$  в (2) зависит от величины потерь, определяемых соотношением (1), и изменяется в пределах  $0 < g_{km} \leq 1$ . Максимальному уровню потерь соответствует значение  $g_{km}$ , как угодно малое, но не равное нулю, поскольку этот коэффициент входит в знаменатель дроби целевой функции. Минимальному уровню потерь соответствует  $g_{km}=1$ . С целью сохранения формулировки задачи в терминах целочисленного программирования коэффициенты  $g_{km}$  выбираются таким образом, чтобы при делении единицы на эти коэффициенты получались целые числа.

Стоимость подключения  $k$ -го абонента к станции  $n$ -го типа, размещенной на  $m$ -м месте кандидате, определяется в соответствии с [5] следующим образом:  $W_{knm} = W_{knm}^{(1)} > 0$ ,  $r \leq R_1$ ;  $W_{knm} = W_{knm}^{(2)} > 0$ ,  $R_1 < r \leq R_2$ ;  $W_{knm} = W_{knm}^{(3)} = 0$ ,  $r > R_2$ . Здесь  $r$  — расстояние между абонентом и базовой станцией;  $R_1 = R_2 / 2$ ;  $R_2$  — радиус действия базовой станции. Стоимость подключения задается в рублях и увеличивается при удалении пользователя от базовой станции, поскольку требуется установка дополнительного оборудования для качественного приема сигнала. При решении тестовых задач использовались следующие условные значения:  $W_{knm}^{(1)} = 10$  тыс. руб.;  $W_{knm}^{(2)} = 20$  тыс. руб.;  $W_{knm}^{(3)} = 0$ . Хотя величины стоимостей подключения могут принимать разные значения, это не влияет на эффективность работы алгоритма.

Для получения корректных решений расчеты по формуле (2) выполняются при следующих ограничениях, обусловленных требованиями стандартов относительно беспроводных сетей фиксированного доступа.

Исходя из необходимости обеспечения электромагнитной совместимости, на каждом из мест кандидатов должно быть размещено не более одной базовой станции

$$\forall m \quad \sum_{n=1}^N X_{nm} \leq 1. \quad (3)$$

Соотношение (3) показывает, что базовые станции будут установлены не на всех, а только на определенных местах кандидатов, образующих минимальное подмножество, обеспечивающее подклю-

чение всех пользователей. В соответствии с нестрогим равенством (3): для любого  $\forall m$  сумма равна единице, если на предполагаемом множестве мест кандидатов установлена хотя бы одна базовая станция, или равна нулю в противном случае.

В соответствии с принятыми ограничениями каждый пользователь должен быть подключен только к одной базовой станции. Это условие может быть записано в следующем виде:

$$\forall k \quad \sum_{m=1}^M Y_{km} = 1. \quad (4)$$

Данное ограничение обусловлено отсутствием эстафетной передачи (хэндовера) в беспроводных сетях фиксированного доступа. Поэтому для корректности процедуры аутентификации и идентификации пользователь может быть подключен только к одной базовой станции. В процессе решения задачи предусматривается последовательное подключение пользователей до тех пор, пока их суммарная пропускная способность не превысит величину максимально возможной пропускной способности базовой станции. В ходе оптимизации рассматривается общий случай подключения разного числа пользователей к каждой из базовых станций. При этом к каждой из станций должен быть подключен хотя бы один абонент.

Для получения корректного решения суммарный трафик всех абонентов, подключенных к станции  $n$ -го типа, размещенной на  $m$ -ом месте, не должен превышать производительности станции. Это условие можно записать в следующем виде:

$$\forall m \quad b_{nm} \geq \sum_{k=1}^K d_k Y_{km}, \quad (5)$$

где  $b_{nm}$  — производительность станции  $n$ -го типа, размещенной на  $m$ -м месте кандидате, Кбит/с;  $d_k$  — требуемая пропускная способность канала для  $k$ -го абонента, Кбит/с.

Здесь тип базовой станции означает оборудование одного производителя. Следовательно, для одной и той же сети можно рассчитать суммарные затраты на размещение базовых станций при установке оборудования разных производителей и выбрать вариант, соответствующий минимальным затратам.

### Генетический алгоритм

На основе генетического подхода в соответствии с полученной математической моделью разработан алгоритм оптимизации размещения базовых станций с учетом рекомендаций [6]. Структурная схема

разработанного алгоритма представлена на рис. 1. Рассмотрим последовательность действий при решении задачи оптимального размещения базовых станций, определяемую данным алгоритмом.

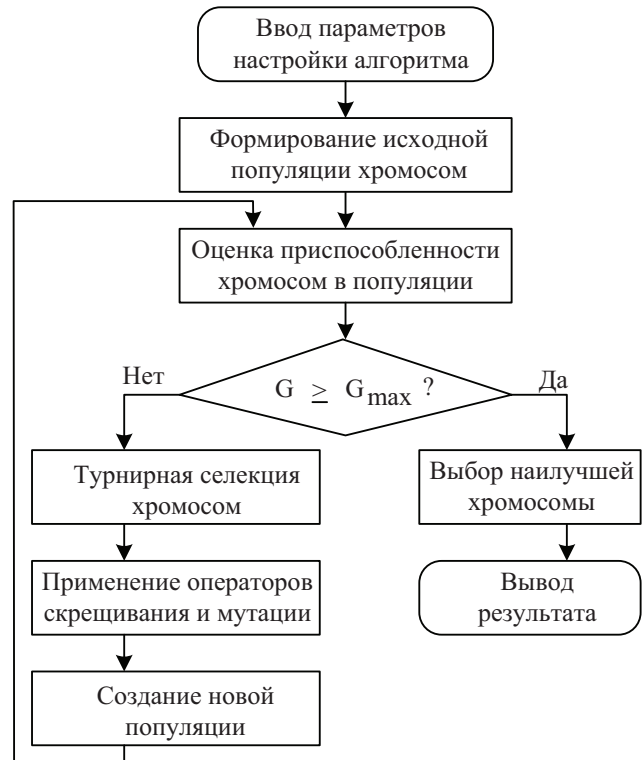


Рис. 1. Схема генетического алгоритма

Первый шаг генетического алгоритма состоит в определении подходящей исходной популяции хромосом. Вместо обычного бинарного представления в виде множества  $[0,1]$ , требующего двоичных строк длиной  $m \times k$  и в то же время не гарантирующего выполнения условий (4) и (5), выбрано представление, в котором каждая хромосома является  $k$ -мерным вектором целых чисел на множестве  $[1,m]$ . Целочисленное значение  $k$ -й позиции указывает базовую станцию, размещенную на  $m$ -ом месте кандидате, к которой прикреплен  $k$ -й абонент. Если, например,  $m = 3$  и  $k = 4$ , то запись хромосомы в виде  $[1,2,1,3]$  означает, что: абоненты с номерами 1 и 3 подключены к базовой станции, установленной на месте кандидате 1; абонент 2 подключен к базовой станции, установленной на месте кандидате 2; пользователь 4 подключен к базовой станции, установленной на месте кандидате 3.

Далее формируется исходная популяция особей случайным выбором заданного количества хромосом. При этом популяция является конечным множеством размерностью  $N_{pop}$ . Число особей в попу-

ляции остается постоянным на протяжении всей работы генетического алгоритма.

После определения подходящей исходной популяции хромосом вычисляются функции приспособленности для каждой из найденных хромосом. При этом функции приспособленности всегда принимают неотрицательные значения.

Затем осуществляется проверка условия завершения задачи. Решение задачи считается полученным при выполнении условия

$$G \geq G_{\max}, \quad (6)$$

где  $G$  — номер текущего поколения;  $G_{\max}$  — максимальное число поколений, заданное в начале работы алгоритма.

В соответствии с (6) поиск минимального значения целевой функции прекращается после того, как номер текущего поколения особей, созданного в ходе работы алгоритма, достигает значения, равного заданному максимальному числу поколений. После достижения заданного числа поколений осуществляется вывод результатов оптимизации расположения базовых станций.

По рассчитанным значениям функции приспособленности производится выбор тех хромосом, которые будут участвовать в создании следующей популяции, т. е. нового поколения. По заданному числу родителей  $N_{par}$  отбирается определенное число хромосом, которым разрешено создавать особей следующего поколения. Если всем особям в популяции разрешено создавать потомков, то  $N_{par} = N_{pop}$ , иначе  $N_{par} < N_{pop}$ . Половина родительских хромосом выбирается на основе турнирной селекции, при которой особи популяции случайным образом разбиваются на подгруппы численностью по 2 хромосомы в каждой. Затем осуществляется выбор в каждой из подгрупп наилучшей особи, обладающей наименьшей функцией приспособленности. Хромосомы, участвующие в турнире, выбираются из числа наилучших особей, упорядоченных по степени ухудшения функции приспособленности. Оставшаяся половина родительских хромосом выбирается случайным образом из числа хромосом, не задействованных в турнире.

Такая стратегия дает возможность создавать потомков всем видам особей, включая наилучших и наихудших. Это улучшает генетическое разнообразие популяции, повышает скорость сходимости на начальных итерациях алгоритма и позволяет в некоторых случаях избежать локальных минимумов. Процесс селекции заканчивается созданием родительской популяции.

К хромосомам, отобранным с помощью селекции, применяются генетические операторы, сначала оператор скрещивания, а затем оператор мутации. В результате образуется новая популяция потомков от родительской популяции, созданной на предыдущей итерации алгоритма. Оператор мутации имеет второстепенное значение. Он применяется к отдельным генам в хромосомах. В рамках задачи оптимального размещения базовых станций мутация интерпретируется как модификация назначений для пользователей. Если до применения оператора мутации пользователь был подключен к одной базовой станции, размещенной на  $m$ -ом месте кандидате, то после мутации он оказывается подключенным к другой базовой станции при условии попадания в радиус ее действия и выполнения ограничения (5). Мутация хромосом выполняется на популяции потомков, образованных в результате проведения процедуры скрещивания. Вероятность мутации моделируется случайным выбором числа из интервала от нуля до единицы для каждого гена и отбором для выполнения этой процедуры тех генов, для которых разыгранное число оказывается меньшим или равным значению, заданному в начале работы алгоритма.

Оператор скрещивания играет первостепенную роль для создания нового поколения и применяется на каждой итерации алгоритма. Для проведения процедуры скрещивания из полученной родительской популяции случайным образом выбираются по две родительские хромосомы  $F1$  и  $F2$ , на основе которых будут сформированы два потомка  $S$ .

Затем определяется хромосома первого потомка. Если  $F1[k] = F2[k]$ , то  $S[k] = F1[k]$ , иначе  $S[k] = 0$ . Здесь происходит поэлементное сравнение хромосом двух родителей. Если целочисленное значение  $k$ -й позиции одинаково у обоих родителей, то оно переписывается в хромосому потомка. В противном случае в хромосому потомка записывается нуль. Далее выбирается родительская хромосома  $F1$  и процедура скрещивания проводится в следующей последовательности:

1. Выбирается случайным образом целое число  $\mu$  из диапазона чисел, соответствующих количеству пользователей.

2. Переменной  $\alpha$  присваивается значение хромосомы  $F1$ , соответствующее значению  $\mu$ -й позиции, т.е.  $\alpha = F1[\mu]$ . Данный процесс предназначен для последующего изменения подключения абонента с одной станции на другую.

3. Для всех элементов в потомке  $S$ , которые равны нулю, присваивается значение переменной



$\alpha$ , т. е. абонент оказывается подключен к другой станции, номер которой равен  $\alpha$ . Если  $k$ -й абонент может быть подключен к станции  $\alpha$  без нарушения ограничения (5) по производительности, то данное подключение считается разрешенным, и значение производительности станции  $\alpha$  обновляется. Если  $k$ -й абонент не может быть подключен к станции  $\alpha$  по причине нарушения условия (5) или при его расположении вне ее радиуса действия, то переменной  $\beta$  присваивается значение хромосомы  $F2$ , соответствующее значению  $\mu$ -й позиции, т. е.  $\beta := F2[\mu]$  и осуществляется подключение абонента к станции, номер которой равен  $\beta$ .

В результате описанной процедуры происходит формирование первого потомка, у которого назначение абонентов базовым станциям отлично от назначения в родительских хромосомах.

Далее выбирается хромосома  $F2$ , и повторяются шаги 1, 2, 3 для формирования второго потомка  $S$ .

После завершения процедуры скрещивания происходит формирование новой популяции, или следующего поколения особей. Хромосомы, полученные в результате применения генетических операторов к хромосомам родительской популяции, включаются в состав нового поколения. Предположим, что в исходных настройках алгоритма задано  $N_{pop} = 100$  и  $N_{par} = 40$ , т. е. из 100 особей популяции только к 40 из них можно применять оператор скрещивания. Из этих 40 особей формируются 20 пар родителей, каждая пара производит по два потомка. Таким образом, 20 пар родителей произведут 40 новых особей. Эти 40 новых особей включаются в состав следующего поколения, и к ним добавляются 60 особей из предыдущего поколения, поскольку значение параметра  $N_{pop}$  должно оставаться постоянным на протяжении всей работы алгоритма. Особи из предыдущего поколения выбираются случайно, и это не обязательно будут хромосомы с наилучшими значениями функции приспособленности. В случае, когда  $N_{par} = N_{pop}$ , вся предшествующая популяция хромосом замещается новой популяцией потомков, имеющей ту же численность.

К заключительной стадии работы алгоритм переходит при выполнении условия (6). В этом случае определяется наилучшая хромосома, имеющая наименьшее значение функции приспособленности среди всех хромосом, составляющих последнее поколение, и выводится результат решения задачи. Эта хромосома, полученная в результате решения задачи, позволяет вычислить суммарную стоимость комплекса.

Разработанный алгоритм оптимизации размещения базовых станций на основе генетического подхода представляет собой пример поисковой процедуры, в которой используется элемент случайности как средство проведения процесса поиска решения среди множества хромосом.

Разработанный алгоритм реализован как программное обеспечение в среде Borland Delphi 7.0, позволяющее решать задачи большой размерности. С помощью данного программного обеспечения проведен ряд численных экспериментов по нахождению оптимального расположения базовых станций и подключения к ним абонентов.

В первом эксперименте проверялась способность генетического алгоритма находить корректные решения. С этой целью было исследовано множество вариантов случайного расположения базовых станций, ограничиваясь задачами малой размерности. Для оценки адекватности полученной математической модели было проведено сравнение результатов решения задачи с помощью генетического алгоритма с данными, полученными методом полного перебора. Получено хорошее соответствие результатов, полученных на основе этих двух подходов, что свидетельствует о корректности проведенного теоретического анализа.

Полный перебор обеспечивает получение точного решения при каждом исполнении алгоритма, за счет значительных затрат машинного времени. Поэтому максимальный размер задач малой размерности, на которых проводились численные эксперименты, был ограничен значениями  $M = 6$ ,  $K = 11$ . При дальнейшем увеличении размерности исходных данных время счета методом полного перебора существенно возрастало (до 10000 с). Нижеследующие примеры иллюстрируют эффективность в отношении времени счета разработанного алгоритма по сравнению с методом полного перебора.

Первым примером иллюстрируется сравнение времени счета  $t$  для решения задач размещения обоими методами при постоянном числе мест кандидатов  $M = 6$  для разного числа подключаемых к ним абонентов  $K = 6, 7, 8, 9, 10, 11$ . Для этих случаев время счета  $t$  методом полного перебора составляло 0,6; 4,2; 27,6; 180,5; 1203,1; 7397,8 с, соответственно. В этих обозначениях числу абонентов  $K = 6$  соответствует  $t = 0,6$  с, для значения  $K = 7$  время счета  $t = 4,2$  с и т. д.

Следующий расчет был проведен при постоянном числе пользователей  $K = 5$  для разного числа мест кандидатов на установку базовых станций  $M = 15, 20, 25, 30, 35, 40$ . При этом время счета мето-

дом перебора составляло 12,0; 55,6; 186,6; 503,9; 1153,3; 2439,7 с, соответственно. Время счета при нахождении оптимального расположения базовых станций с помощью разработанного алгоритма в обоих примерах было равно всего 0,02 с.

Результаты этих двух примеров показывают, что время счета методом полного перебора в большей степени зависит от числа абонентов, и в меньшей степени от числа мест кандидатов. Это различие обусловлено тем, что длина хромосом определяется количеством абонентов, присутствующих в задаче. В отличие от метода полного перебора для задач малой размерности время расчета с помощью генетического алгоритма очень мало и практически не зависит от входных данных. При таком значительном различии во времени счета результаты, полученные с помощью генетического алгоритма, хорошо согласуются с данными, найденными методом полного перебора.

Следующий пример иллюстрирует применение разработанного алгоритма для решения задачи оптимального размещения базовых станций и подключения к ним абонентов. Предположим, что на территории с относительными размерами  $30 \times 30$  определены места кандидаты на установку базовых станций, потенциальные пользователи и виды запрашиваемых ими услуг. Необходимо среди заданного множества мест кандидатов выбрать такое подмножество, которое обеспечит подключение всех абонентов с обеспечением качества предоставляемых услуг при минимальной стоимости всей создаваемой сети.

Начальное взаимное размещение мест кандидатов и абонентов показано на рис. 2. Оптимизацию проводим при следующих исходных данных:  $M=6$ ;  $K=11$ ;  $N=1$ ;  $W_{kmm}^{(1)}=10$  тыс. руб.;  $W_{kmm}^{(2)}=20$  тыс. руб.;  $W_{kmm}^{(3)}=0$ ;  $b_{nm}=20$  Мбит/с;  $c_n=900$  тыс. руб.;  $d_k=2048$  Кбит/с;  $R_1=10$  км;  $R_2=20$  км;  $G_{\max}=30$ ;  $N_{par}=6$ ;  $N_{pop}=10$ . Предполагается, что в сети будет установлено более одной базовой станции, чтобы подключить всех абонентов без нарушения условия (5).

Результаты численного исследования представлены на рис. 3. По итогам оптимизации установлено 2 базовые станции на местах кандидатах 1 и 4. Места кандидаты, на которых установлены базовые станции, отображены кругами, абоненты обозначены квадратами. Неиспользованные места кандидаты, на которых не установлены базовые станции, отмечены перечеркнутыми кругами. Соединительными линиями показано, к какой базовой станции подключены конкретные пользователи.

Минимальная стоимость комплекса, соответствующая такой итоговой конфигурации сети, составляет 1920000 тыс. руб.

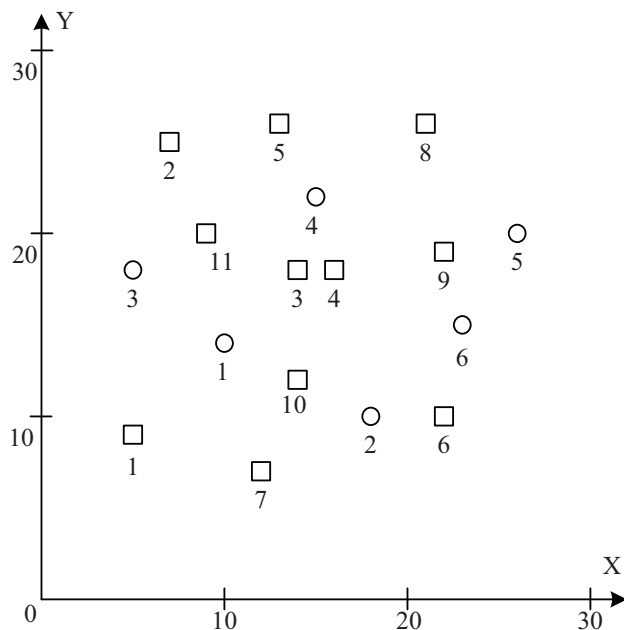


Рис. 2. Схема размещения мест кандидатов (круги) и абонентов (квадраты)

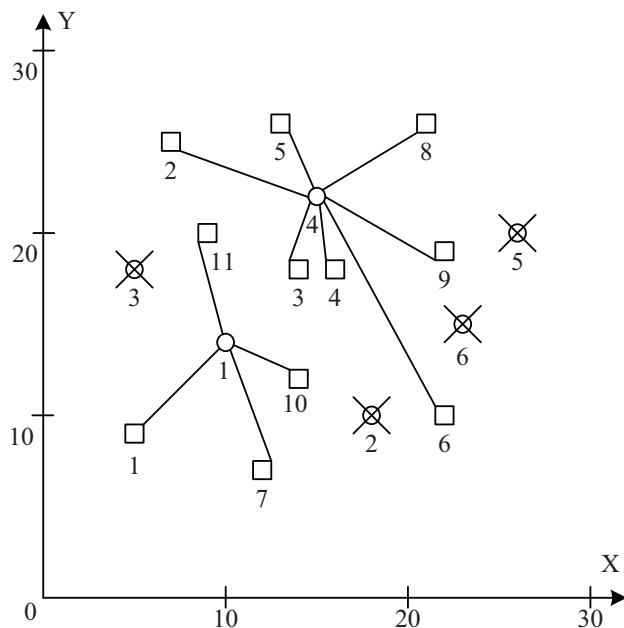


Рис. 3. Размещение базовых станций и абонентов после оптимизации

Второй численный эксперимент посвящен исследованию разработанного генетического алгоритма применительно к решению задач средней размерности. В этом случае метод полного перебора не использовался вследствие больших затрат машинного времени, поэтому сравнение результатов решения задач не проводилось.

Результаты расчетов согласно второму численному эксперименту приведены в табл. 1. и табл. 2. Видно, что время работы алгоритма с повышением размерности задачи быстро возрастает. При этом зависимость времени работы алгоритма от числа мест кандидатов при постоянном числе пользователей (табл. 2) выражена гораздо слабее, чем в случае, который иллюстрируется табл. 1.

Таблица 1. Зависимость времени работы алгоритма при постоянном числе мест кандидатов  $M = 40$

$K$	40	60	80	90	100
$t, c$	0,1	13,7	130,9	238,3	388,4

Таблица 2. Зависимость времени работы алгоритма при постоянном числе пользователей  $K = 50$

$M$	40	60	80	90	100
$t, c$	0,1	3,6	13,1	37,9	51,7

В ходе численных экспериментов отмечена плавная сходимость решения к результату, показанному на рис. 3, при увеличении числа поколений, размеров исходной популяции и количества родителей. Смещение этих параметров настройки генетического алгоритма в сторону увеличения повышает качество получаемого решения, но при этом увеличиваются затраты машинного времени, необходимые для получения результата, как это иллюстрируется табл. 3, табл. 4 и табл. 5 при решении задачи средней размерности с числом мест кандидатов  $M = 50$  и числом пользователей  $K = 50$ .

Таблица 3. Зависимость времени работы генетического алгоритма от числа поколений

Число поколений	10	200	1000	2000	10000
Время счета, с	3,1	4,6	20,8	37,9	189,9

Таблица 4. Зависимость времени работы генетического алгоритма от размера исходной популяции

Размер популяции	10	1000	5000	10000	20000
Время счета, с	3,1	5,4	8,0	23,2	70,9

Таблица 5. Зависимость времени работы генетического алгоритма от количества родителей

Количество родителей	50	100	500	1000	2000
Время счета, с	7,5	8,9	38,6	59,3	118,3

Эти данные дают возможность выбрать параметры задачи из условия компромисса между качеством получаемого решения и временем счета.

## Заключение

В статье представлено решение задачи оптимального размещения базовых станций и подключения к ним абонентов на основе генетического подхода. Получена математическая модель с учетом потерь мощности сигналов при распространении в реальных каналах связи. Данная математическая модель реализована в виде генетического алгоритма. На основе предложенного алгоритма, а также метода полного перебора разработано программное обеспечение, позволяющее находить решение задач большой размерности. Программная реализация и результаты компьютерного моделирования подтверждают правильность разработанных теоретических положений относительно использования генетического подхода для решения задач размещения базовых станций. Корректность теоретического анализа подтверждена данными, полученными методом полного перебора. Проведена оценка времени счета в зависимости от параметров задачи. Показано, что для задач малой и средней размерности разработанный алгоритм обеспечивает минимальное время счета. Результаты решения задачи для конкретного примера демонстрируют неоспоримое преимущество разработанного генетического алгоритма по сравнению с методом полного перебора. Полученные результаты могут быть успешно применены для создания муравьиных алгоритмов оптимизации размещения базовых станций.

## Литература

1. Рутковский Л., Рутковская Д., Пилиньский М. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И. Д. Рудинского. — М.: Горячая линия — Телеком, 2006. — 383 с.
2. Курейчик В. М., Курейчик В. В., Гладков Л. А. Генетические алгоритмы: Учебное пособие. — М.: Физматлит, 2006. — 320 с.
3. Вишневецкий В., Ляхов А., Шахнович И., Портной С. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. — М.: Техносфера, 2005. — 456 с.
4. Erceg V., Hari K. V. S., et al. Channel models for fixed wireless applications // Technical Report IEEE 802.16a-03/01, June 2003. — 38 P.
5. Зыбин В. А., Крылов В. В. Исследование новых возможностей использования технологии WiMAX // Труды 10-й научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород, Россия, 2006. — С. 66—67.
6. Cortinhal M. J., Captivo M. E. Genetic algorithms for the single source capacitated location problem: a computational study // Proceedings of 4th Metaheuristics International Conference, Porto, Portugal, 2001. — P. 355—359.

Поступила после переработки 23.09.2010